

УДК 536.212.2:621.91.01
DOI

ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА С ПОКРЫТИЕМ ПО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ

Крайнев Д.В., Тихонова Ж.С., Рогачев А.В., Нилидин Д.А., Чигиринская Н.В.

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград,
e-mail: alexsandrogachev@ya.ru*

В статье рассматриваются методы и результаты исследования возможности использования теплофизических свойств твердосплавного инструмента с многослойными покрытиями в качестве критерия для оценки режущих свойств инструмента. Предварительная оценка режущих свойств инструментального материала выполнялась путем измерения величины термоЭДС. В рамках исследования данная величина рассматривается в качестве эталонной меры для оценки существования корреляционной связи с другими теплофизическими свойствами. Описана методика измерения величины теплопроводности методом «горячей плиты». Преимуществами данного метода являются возможность измерения образцов простой формы, малая погрешность измерения и сравнительно небольшая длительность испытания, но при этом проведение измерений требует предварительной подготовки образцов. Стоит отметить, что стабильность значений коэффициента теплопроводности исследуемой партии серийно выпускаемого инструмента достаточно высока. Проведен анализ корреляционной связи между коэффициентом теплопроводности и величиной термоЭДС, в результате которого сделан вывод, что вероятность существования функциональной зависимости между величинами не превышает 14,5%. Таким образом, результаты исследования позволяют сделать вывод о невозможности использования величины теплопроводности твердосплавного инструмента с многослойным покрытием в качестве критерия для оценки режущих свойств инструмента.

Ключевые слова: теплопроводность, режущие свойства, термоЭДС, инструмент с покрытием

THE ABILITY TO EVALUATE THE CUTTING PROPERTIES OF A COATED CARBIDE TOOL BASED ON THERMOPHYSICAL PROPERTIES

Kraynev D.V., Tikhonova Z.S., Rogachev A.V., Nilidin D.A., Chigirinskaya N.V.

Volgograd State Technical University, Volgograd, e-mail: alexsandrogachev@ya.ru

The article is devoted to the study of the possibility of using the thermophysical properties of a carbide tool with multilayer coatings as a criterion for evaluating the cutting properties of the tool. A preliminary assessment of the cutting properties of the tool material was performed by measuring the value of thermal EMF. In the framework of the study, this value is considered as a reference measure to assess the existence of a correlation with other thermophysical properties. The method of measuring the thermal conductivity by the hot plate method is described. The advantages of this method are the ability to measure samples of a simple shape, a small measurement error and a relatively short test duration, but at the same time, measurements require preliminary preparation of samples. It is worth noting that the stability of the values of the thermal conductivity coefficient of the studied batch of commercially available tools is quite high. The analysis of the correlation between the coefficient of thermal conductivity and the value of thermal EMF was carried out, as a result of which it was concluded that the probability of the existence of a functional dependence between the values does not exceed 14.5%. Thus, the results of the study allow us to conclude that it is impossible to use the thermal conductivity of a carbide tool with a multilayer coating as a criterion for evaluating the cutting properties of the tool.

Keywords: thermal conductivity, cutting properties, thermal EMF, coated tool

Эффективность процессов резания в металлообработке тесно связана с технологическими возможностями и надежностью режущего инструмента, так как именно инструмент является ключевым элементом в процессе обработки металла, и его характеристики непосредственно влияют на производительность и качество изготавливаемых деталей. В процессе лезвийной обработки на инструмент интенсивное воздействие оказывают множество разнообразных факторов, таких как обрабатываемый материал, скорость резания, температурные

условия, геометрия инструмента, электро- и теплофизические свойства и др. [1, 2]. В связи с этим определение степени влияния отдельных факторов на режущие свойства, а также установление аналитических и математических зависимостей с целью оптимального управления и обеспечения наибольшей эффективности процесса лезвийной обработки, в том числе при разработке и внедрении новых инструментальных технологий и методов, не представляются возможными без оценки работоспособности инструмента.

Целью данного исследования является определение возможности оперативной оценки режущих свойств инструмента с покрытием по его теплофизическим свойствам.

Материал и методика исследования

В качестве основного инструментального материала при проведении экспериментальных исследований применялись твердосплавные инструменты марки Sandvik. Были отобраны пластины WNMG080408-PM 4225 группы применимости «Р» и пластины WNMG080408-MM 2220 группы применимости «М». Пластины имеют покрытие, нанесенное методом CVD, включающее в себя слои Ti(CN)/Al₂O₃/TiN, с дополнительной обработкой поверхности для снижения внутренних напряжений в покрытии.

Анализ данных о структуре многослойных износостойких покрытий показал, что для теплофизических расчетов применительно к задачам резания металлов инструментом с многослойными покрытиями с достаточной точностью можно принять [3, 4]:

– объемное соотношение слоев для CVD-покрытий: TiCN – 50%; Al₂O₃ – 40%; TiN – 10%. Понятие эффективной теплопроводности подразумевает под собой интегральную характеристику, учитывающую влияние теплопроводности и толщины индивидуальных слоев на общую теплопроводность многослойного износостойкого покрытия на режущем инструменте;

– для расчета эффективной теплопроводности твердосплавного инструмента с многослойными износостойкими покрытиями толщина твердосплавной основы принимается равной [3, 5] толщине покрытия.

Такие допущения объясняются следующим. Толщина матрицы твердосплавной

пластины (~5 мм) измеряется величинами, на несколько порядков большими по сравнению как с толщиной каждого слоя покрытия (рис. 1), так и с толщиной многослойного покрытия в целом. Для оценки влияния особенностей твердосплавного инструмента на этапе технологической подготовки производства и при моделировании тепловых процессов в зоне резания (быстропротекающие процессы) следует учитывать, что основная доля тепловой энергии концентрируется в приповерхностных объемах контактирующих тел – на передней и задней поверхностях инструмента, обработанной поверхности заготовки, прирезцовою поверхности стружки. Именно по этой причине авторы исследований [3, 5] и других исследований тепловых процессов делают отмеченные выше допущения.

Результаты исследования и их обсуждение

Для предварительной оценки режущих свойств инструментального материала выбран параметр термоЭДС в качестве управляемого фактора, на всех твердосплавных пластинах произведено измерение величины термоЭДС [6] на режимах пробного прохода (тарирование) при обработке стали 40X (группа обрабатываемости «Р») и стали 12X13 (группа обрабатываемости «М»).

В рамках настоящего исследования величина термоЭДС пробного рабочего хода рассматривается в качестве эталонной меры для оценки существования корреляционной связи с другими теплофизическими свойствами серийно выпускаемого твердосплавного инструмента. Функциональная связь величины термоЭДС с режущей способностью твердосплавного инструмента была обоснована ранее [2].

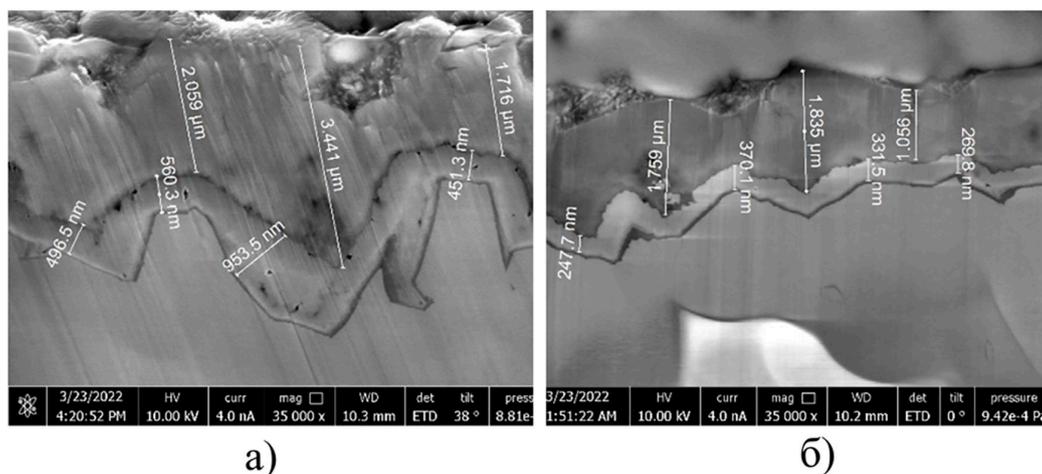


Рис. 1. Толщина слоев износостойкого покрытия:
а – твердый сплав PM 4225, б – твердый сплав MM 2220

Для исследования теплофизических свойств был выбран метод «горячей плиты», поскольку он:

- предполагает прямое измерение теплопроводности с учетом размеров образца, температуры нагрева и времени испытаний;
- позволяет использовать образцы простой (прямоугольный параллелепипед) формы;
- характеризуется малой (до 5%) погрешностью и сравнительно небольшим (до 5 мин) временем испытаний.

Математическую основу метода составляет известный закон Фурье (1):

$$P = -\lambda \frac{S \cdot \Delta T}{L} \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности исследуемого образца; S, L – площадь сечения и высота образца соответственно; ΔT – перепад температур между верхней и нижней плоскостью образца; P – мощность теплового источника.

Для слоистых материалов рекомендуется [4, 5] определять эффективный коэффициент теплопроводности (2) в соответствии с удельной долей (оценивается по толщине) каждого слоя в отдельности:

$$\frac{L_{\Sigma}}{\lambda_{эф}} = \sum_i \frac{L_i}{\lambda_i} \quad (2)$$

где $\lambda_{эф}, \lambda_i$ – коэффициенты теплопроводности соответственно для многослойного материала и каждого отдельного слоя; L_{Σ}, L_i – суммарная толщина многослойного композита и толщины отдельных слоев.

Рассмотрим, насколько существенно теплофизические характеристики материалов твердосплавной матрицы и слоев многослойного покрытия влияют на величину эффективного коэффициента теплопроводности. Результаты укрупненного расчета

для пластин WNMG 0804, характеристика твердого сплава PM 4225 для видов обработки P01–P40 и MM 2220 для видов обработки M05–M35 представлены в таблице 1.

Следует отметить, что во всех рассмотренных случаях различие между эффективной теплопроводностью инструмента с многослойными износостойкими покрытиями и расчетной теплопроводностью твердосплавной матрицы находится в пределах 0,17–0,34%.

Метод «горячей плиты» реализован в измерителе теплопроводности «КИТ-02Ц «Алмаз». Прибор предназначен для измерения коэффициента теплопроводности высокотеплопроводных материалов в диапазоне 90–1500 Вт/м*К. Соответствующей калибровкой по эталонам нижний предел измеряемой теплопроводности может быть смещен до 1 Вт/м*К. Для проведения калибровки в комплект поставки прибора входят эталонные образцы из таких материалов, как медь, алюминий, никель.

Испытуемый образец (рис. 2) размерами не более 12x12 мм закрепляется в термоизолированной рабочей зоне между верхним (нагреватель) и нижним (теплоотвод) измерительными элементами.

По изменению температуры на противоположных торцах образца за определенное время определяют величину коэффициента теплопроводности. При исследовании слоистых материалов оценивается интегральная теплопроводность образца с учетом величины теплопроводности и толщины каждого слоя. Образцы для измерения теплопроводности вырезаны из многогранных неперетачиваемых пластин на проволочно-электроэрозионном станке. Торцы образцов, контактирующие с нагревателем и теплоприемником (рис. 3), отполированы для обеспечения максимально возможной сплошности контакта и, соответственно, снижения погрешностей метода.

Таблица 1

Эффективная теплопроводность инструмента

Группа обрабатываемого материала и вид обработки по ISO			P01–P05	P10–P20	P25–P40	M05–M20	M25–M35
Расчетная теплопроводность твердосплавной основы λ , Вт/(м*К)			23	27	41	50	52
Расчетная теплопроводность и толщина отдельных слоев покрытия, λ_i (Вт/(м*К)) / L_i (мкм)	TiN	36,50	1,5	1,4	1,2	0,6	0,6
	Al ₂ O ₃	29,28	6,0	5,6	4,8	2,2	2,2
	TiCN	10,00	7,5	7,0	6,0	2,8	2,8
Эффективная теплопроводность инструмента с многослойным износостойким покрытием $\lambda_{эф}$ (Вт/(м*К), $L_{\Sigma} = 4,762$ мм)			22,962	26,937	40,852	49,866	51,853

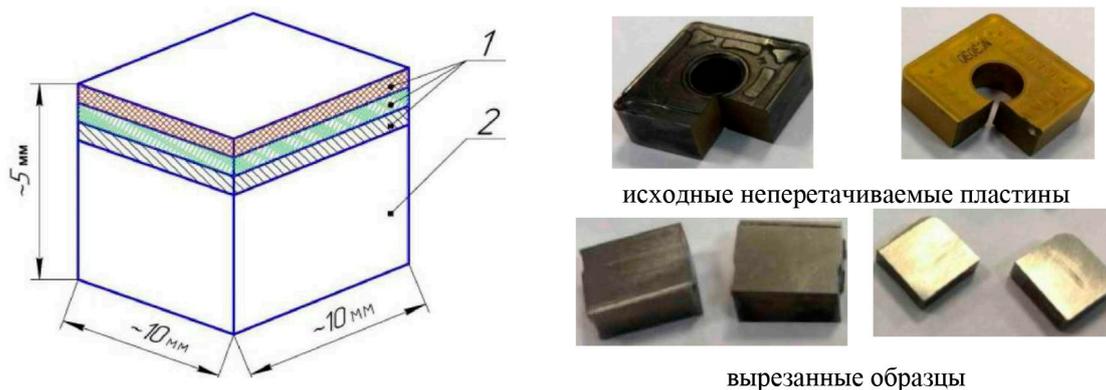


Рис. 2. Образец для измерения теплопроводности твердого сплава с многослойным износостойким покрытием:
1 – многослойное износостойкое покрытие; 2 – твердосплавная основа

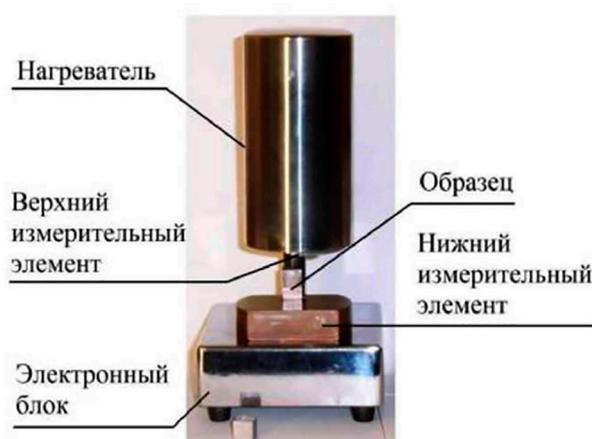


Рис. 3. Схема измерения теплопроводности

Количество повторений каждого опыта определено в соответствии с апробированными методиками [7] как наибольшее из двух допустимых по критериям Стьюдента (условие неизменности среднего значения в серии опытов) и Фишера (условие неизменности дисперсии в серии опытов). Доверительная вероятность не менее 95%. Погрешность измерений в соответствии с паспортными характеристиками прибора для измерений теплопроводности – не более 5%. Средние значения коэффициентов теплопроводности (λ) для каждой твердосплавной пластины приведены в таблицах 2, 3.

Отметим, что стабильность значений коэффициента теплопроводности в исследуемой партии серийно выпускаемого инструмента достаточно высока – коэффициент вариации равен 0,005 и 0,023 для группы Р и М соответственно. Разброс значений следует признать случайным, поскольку все экспериментально определенные значения коэффициента теплопроводности по-

падают в 10%-й интервал, определяемый допустимой погрешностью измерительного прибора.

Этот факт наглядно представлен на рисунках 4, 5. Корреляционная связь между исследуемой (коэффициент теплопроводности) и эталонной (термоЭДС пробного рабочего хода) характеристиками серийно выпускаемого режущего инструмента отсутствует. Такой вывод следует из малого абсолютного значения коэффициента парной корреляции и визуального сопоставления данных – вероятность существования корреляционной связи не превышает 0,2% для пластин группы Р и 14,5% для группы М.

Ранее проведенными исследованиями [2] была подтверждена устойчивая функциональная связь между термоЭДС пробного рабочего хода [6] и показателями работоспособности (интенсивностью изнашивания и величиной периода стойкости) твердосплавного режущего инструмента с износостойкими покрытиями.

Таблица 2

Теплопроводность пластин WNMG080408 PM4425, группа Р

интервал	стандартных отклонения														
	0,52 Вт/(м*К) = 4,83														
среднее значение	22,99														
стандартное отклонение	0,108														
коэффициент вариации	0,005														
коэф. корреляции с термоЭДС	0,002														
№ пластины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
термоЭДС, мВ	4,9	5,9	5,1	5,1	5,1	5,6	4,9	4,9	5,0	5,2	5,4	5,9	5,2	5,3	5,6
λ , Вт/(м*К)	22,86	22,97	22,98	22,96	23,14	22,96	22,97	22,92	22,96	22,91	22,96	22,94	22,94	23,05	22,99
№ пластины	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
термоЭДС, мВ	5,9	5,2	5,4	5,4	5,3	5,4	4,9	5,1	5,1	4,9	4,9	5,1	5,0	5,9	5,0
λ , Вт/(м*К)	22,94	22,93	22,87	22,96	22,92	22,96	23,05	22,87	23,12	22,91	22,94	23,03	22,96	23,12	23,02

Таблица 3

Теплопроводность пластин WNMG 080408 MM2220, группа М

интервал	стандартного отклонения														
	3,85 Вт/(м*К) = 3,28														
среднее значение	50,09														
стандартное отклонение	1,174														
коэффициент вариации	0,023														
коэф. корреляции с термоЭДС	0,145														
№ пластины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
термоЭДС, мВ	18,3	11,5	12,3	9,7	13,0	12,9	10,1	12,7	11,4	17,6	7,8	10,9	10,3	10,9	13,8
λ , Вт/(м*К)	51,05	51,25	50,75	50,00	48,95	49,05	51,10	52,45	50,00	48,80	49,15	49,55	48,60	50,00	48,65
№ пластины	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
термоЭДС, мВ	11,4	12,3	12,5	11,6	11,9	10,1	11,3	11,5	11,5	11,6	11,4	12,1	11,3	14,8	11,4
λ , Вт/(м*К)	49,90	52,00	52,05	49,80	50,00	49,80	48,8	49,05	49,20	49,15	49,20	51,50	52,00	51,85	49,15

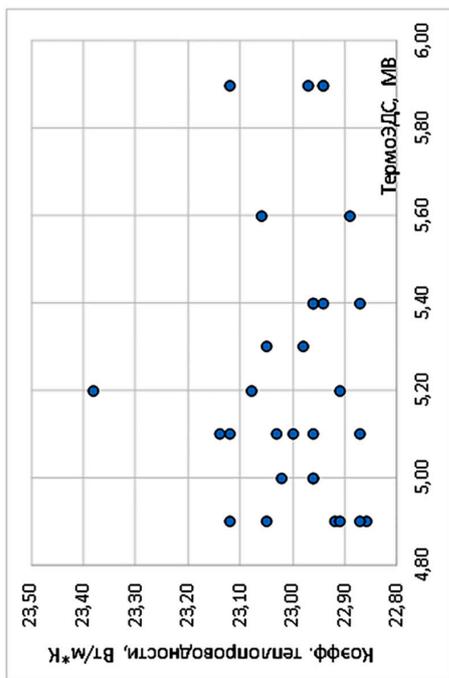
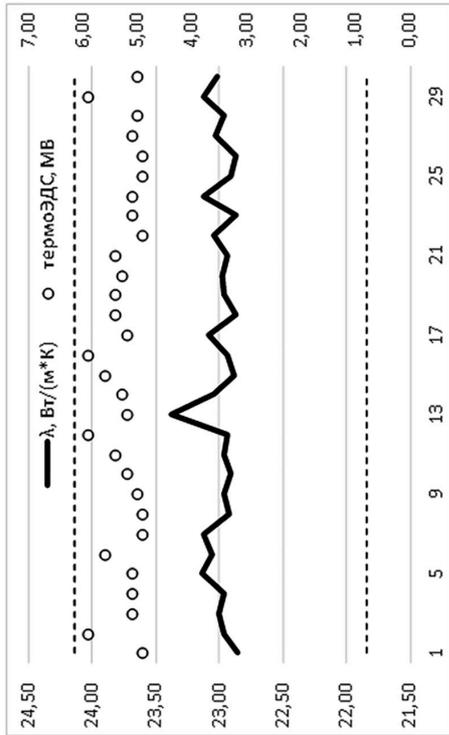


Рис. 4. Графическое представление корреляционной связи между термоЭДС и коэффициентом теплопроводности (группа обрабатываемости Р)

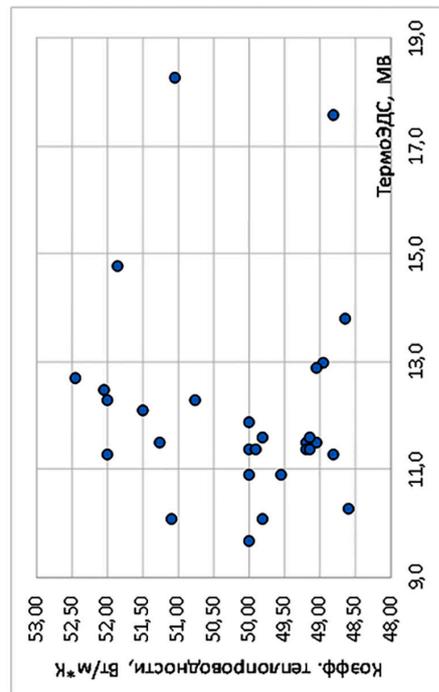
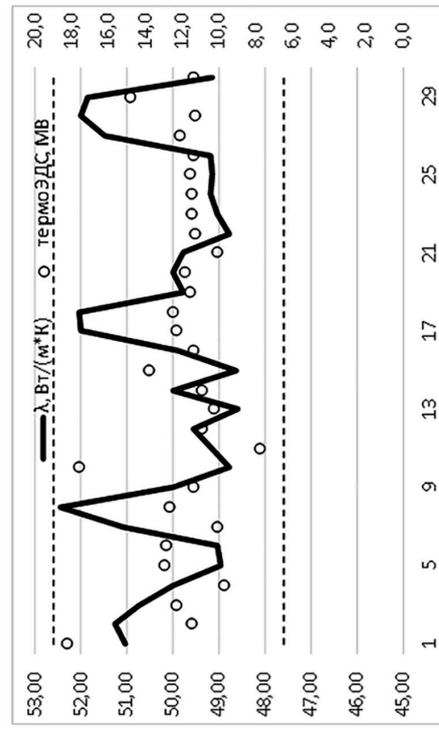


Рис. 5. Графическое представление корреляционной связи между термоЭДС и коэффициентом теплопроводности (группа обрабатываемости М)

Отсутствие корреляционной связи между коэффициентом теплопроводности инструментального материала и термоЭДС пробного рабочего хода позволяет утверждать, что связь между теплопроводностью и работоспособностью инструмента также отсутствует.

Выводы

В результате проведенных исследований сделан вывод о невозможности использования величины теплопроводности твердосплавного инструмента с многослойным CVD-покрытием в качестве критерия для оценки свойств инструмента. Такой вывод обоснован следующим.

Наличие функциональной связи режущей способности твердосплавного инструмента с многослойным CVD-покрытием с его теплофизическими свойствами статистически не подтверждается. Вероятность существования такой связи оценивается по коэффициенту корреляции между соответствующими характеристиками и величиной термоЭДС пробного рабочего хода. Ранее выполненными исследованиями доказана возможность использования термоЭДС в качестве критерия долговечности режущего инструмента. Вероятность существования рассматриваемой функциональной связи не превышает 14,5%.

Информационная способность теплофизических свойств твердосплавного инструмента с многослойным CVD-покрытием с точки зрения оперативной диагностики состояния режущего инструмента в процессе эксплуатации несущественна:

– требуется применение «разрушающих» методов контроля для оценки названных свойств;

– отсутствует функциональная связь между работоспособностью режущего инструмента и теплофизическими свойствами.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что коэффициент теплопроводности твердосплавного инструмента с многослойным CVD-покрытием не может рассматриваться в качестве информационного канала для оперативной оценки режущих свойств инструмента.

Список литературы

1. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания и износа инструмента. Волгоград: ВолгПИ, 1988. 126 с.
2. Определение рациональных условий эксплуатации твердосплавного инструмента с наноструктурированным поверхностным слоем рабочей части по критерию повышения долговечности при точении конструкционных материалов различных групп: заключительный отчет о НИР № 101-01/2021 (26/365-21). Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, ИМАШ РАН, 2021. 69 с.
3. Ингеманссон А.Р., Бондарев А.А. Определение теплопроводности твердосплавного режущего инструмента с многослойными износостойкими покрытиями // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2019. Т. 21, № 3. С. 97-105.
4. Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Проничев Д.В., Петров А.Э. Исследование теплопроводности биметаллических соединений из однородных и разнородных сталей // Известия ВолгГТУ. Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении». 2009. № 11. С. 31-35.
5. Zhao J., Liu Z., Wang B., Hu J., Wan Y. Tool coating effects on cutting temperature during metal cutting processes: comprehensive review and future research directions // Mech. Syst. Signal Process. 2021. Vol. 150. P. 107302. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107302.
6. Плотников А.Л., Кристаль М.Г., Сергеев А.С., Тихонова Ж.С., Уварова Т.В. Устройство для измерения температуры реза естественной термопарой // Патент RU 2650827 С1 МПК G01K13/00, G01K7/02; Патентообладатели: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ) (RU), 2018. 7 с.
7. Чигиринская Н.В., Чигиринский Ю.Л., Горобцов А.С. Моделирование неперiodических стохастических процессов: учебное пособие. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2020. 107 с.